

Aktív párhuzamos hibrid energiatároló rendszer áramirányítóinak a szabályozása

Control of power electronic converters from an active parallel hybrid energy storage system

FERENCZ János¹, doktorandusz; dr. KELEMEN András, egyetemi adjunktus²;
dr. IMECS Mária, emeritus egyetemi tanár³

¹ S. N. Radiocomunicații S. A.,

Csíksszereda, Hunyadi János utca, 28 A, janos.ferencz@radiocom.ro, www.radiocom.ro,

² Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar,

540485 Marosvásárhely, O.p. 9, C.p. 4, kandras@ms.sapientia.ro, www.ms.sapientia.ro,

³ Kolozsvári Műszaki Egyetem,

Memorandumului utca 28, Kolozsvár 400114 maria.imecs@emd.utcluj.ro, www.utcluj.ro

Abstract

The paper deals with the control of the power electronic converters from an active parallel hybrid energy storage system (HESS), which contains a high energy density battery and a high-power density supercapacitor. The load of the HESS is the electrical motor drive of an electric vehicle. The interfaces between the DC-link and the power sources are four-phase bidirectional DC-DC converters driven in current control mode, based on the current references supplied by an active parallel HESS power distribution algorithm. There are presented MATLAB/Simulink[®] simulation results in driving and regenerative braking operation modes of the electric vehicle.

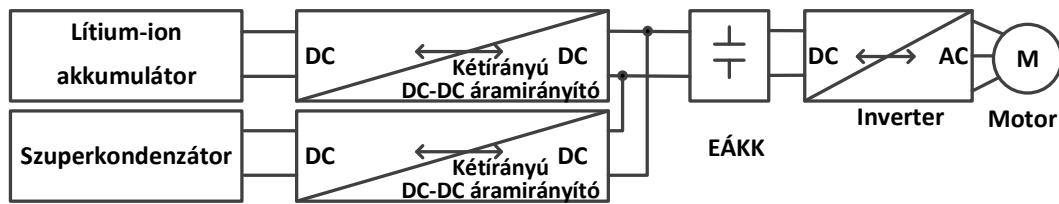
Kivonat

A dolgozat egy olyan aktív párhuzamos hibrid energiatároló rendszert (HETR) tanulmányoz, amelynek az energiatárolói egy nagy energiasűrűségű akkumulátor és egy nagy teljesítménysűrűségű szuperkondenzátor. A hibrid energiatároló rendszer terhelése egy villamos autó villamos hajtása. Az energiatárolók és az egyenáramú közbenső kör közötti interfészek áramszabályozott, kétirányú, négyfázisú, átlapolásos vezérlésű DC-DC áramirányítók, amelyek áramreferenciáit az aktív párhuzamos HETR energiamenedzsment algoritmus határozza meg. A dolgozat MATLAB/Simulink[®] környezetben megvalósított szimulációs eredményeket mutat be a villamos jármű menet- és regeneratív fékezési üzemmódjaiban.

Kulcsszavak: hibrid energiatároló rendszer, kétirányú 4-fázisú DC-DC áramirányító, átlapolásos vezérlés, energiamegosztás, regeneratív fékezés, teljesítménymegosztó szabályozási struktúra

1. Bevezető

A nemzetközi szakirodalomban a két elektromos energiaforrással és egy terheléssel rendelkező hibrid energiatároló rendszereknek (HETR) teljesítményelektronikai szempontból hét különböző topológiája lelhető fel [1]. Az egyik ilyen HETR változat az 1. Ábrán szemléltetett aktív párhuzamos topológia, amely esetében mindkét energiaforrás kétirányú DC-DC áramirányítón (egyenáram úgy a bemeneten, mint a kimeneten) keresztül csatlakozik az egyenáramú közbülsőkörhöz (EÁKK). Ezekkel az áramirányítókkal szabályozni lehet a teljesítménymegosztást a lítium-ion akkumulátor és a szuperkondenzátor között, melyekkel a villamos jármű hajtásrendszerét betápláljuk. A kétirányú DC-DC áramirányító azért szükséges, mivel a HETR mechanikai teljesítmény leadásakor energiaforrásként, viszont visszatápláló regeneratív fékezési üzemmódban energiatároló rendszerként működik.



1. ábra

Az aktív párhuzamos hibrid energiatároló rendszer (HETR) tömbvázlata.

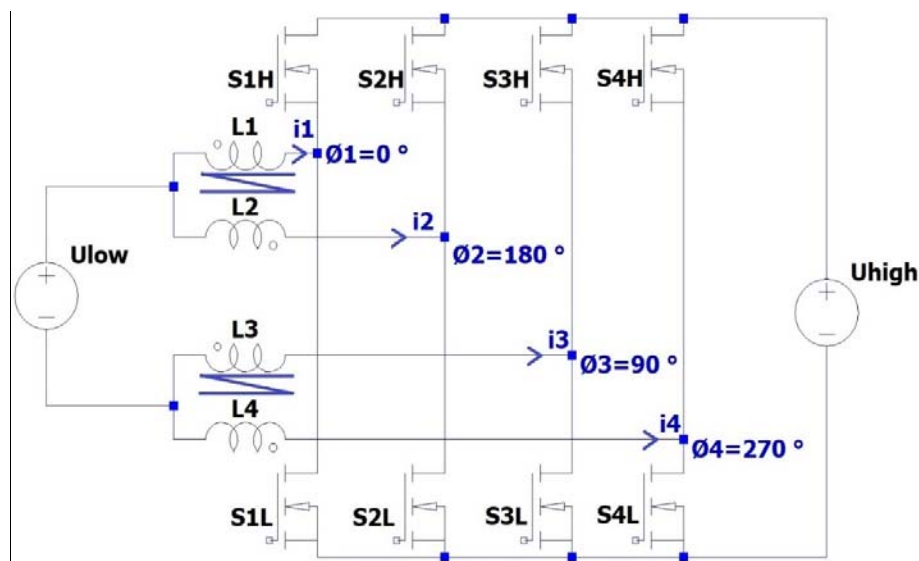
A kétirányú energiaáramlás biztosítása azért is szükséges, hogy működés közben a villamos jármű az akkumulátorról tölteni tudja a szuperkondenzátort annak alacsony energiaszintű állapotában.

2. A kétirányú 4-fázisú átlapolásos vezérlésű DC-DC áramirányító

Az aktív párhuzamos HETR két kétirányú áramirányítót tartalmaz. Mindkettőnek a terhelésoldali kimenete ugyanarra az egyenáramú közbenső körre (EÁKK) van kapcsolva, melyet gyakorlatilag egy kondenzátor alkot és melyről terhelésként a jármű villamos hajtásrendszerét tápláljuk (1. Ábra) [1].

Mivel a gyakorlatban a villamos járművek HETR-ének akkumulátora és szuperkondenzátora nincs egymástól galvanikusan leválasztva, ezért kétirányú, galvanikus leválasztást nem biztosító magas hatásfokú DC-DC áramirányító került alkalmazásra [3].

A 2. Ábrán bemutatott kétirányú, 4-fázisú átlapolásos vezérlésű (4FL) angolul „*Interleaved Four Phase*”-nek nevezett DC-DC áramirányító négy, kettőnként mágnesezen csatolt tekercset tartalmaz [3].



2. ábra

A kétirányú 4-fázisú átlapolásos vezérlésű DC-DC áramirányító topológiája [3].

A kétirányú 4FL DC-DC áramirányító nyolc MOSFET teljesítménytranzisztort tartalmaz, amelyek páronként négy ágat alkotnak. Minden ág felső tranzisztornak rácskéjele komplementáris az ág alsó rácskéjellel (S_{1H} komplementárisa az S_{1L} -nek, stb.). A 2. Ábrán az ágak mellett feltüntetett villamosszögek a 3. Ábrán látható logikai vezérlőjelek fáziseltolását jelentik az 1-es ág alsó tranzisztornak S_{1L} vezérlőjéhez képest (ezek $\frac{T_s}{4}$, $\frac{T_s}{2}$, illetve $\frac{3T_s}{4}$ időbeli eltolásoknak felelnek meg) [3].

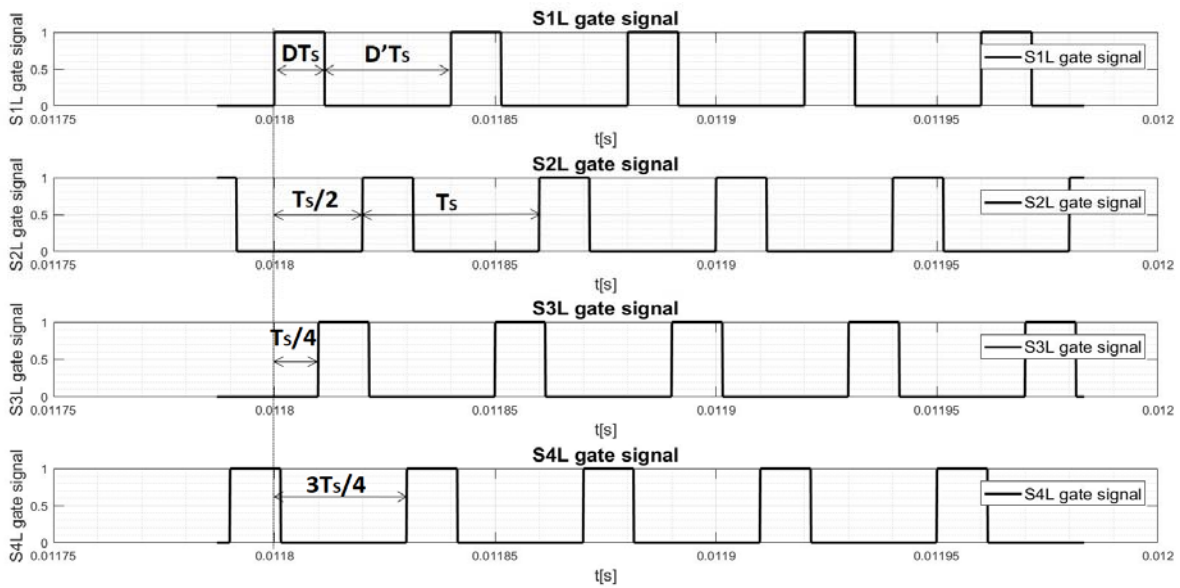
A mágneses csatolást a tekercsek méretének a csökkentése és az áramirányító hatásfokának a növelése teszi célszerűvé [2], [3]. Fontos megjegyezni, hogy a kétirányú 4FL DC-DC áramirányító

működéséhez elengedhetetlen, hogy az inverter felőli, bemeneti oldali feszültségforrás (U_{low}) feszültsége alacsonyabb legyen, mint az EÁKK-felőli, kimeneti oldali feszültségforrásé (U_{high}).

A kétirányú 4FL DC-DC áramirányító szimulációja MATLAB/Simulink[®] környezetben történt. A csatolt tekercsek $L_{1,2,3,4}$ induktivitását az alábbi összefüggéssel határoztuk meg [2]:

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = \frac{U_{low} * D_{MAX}}{\Delta I_L * f_s}, \quad (1)$$

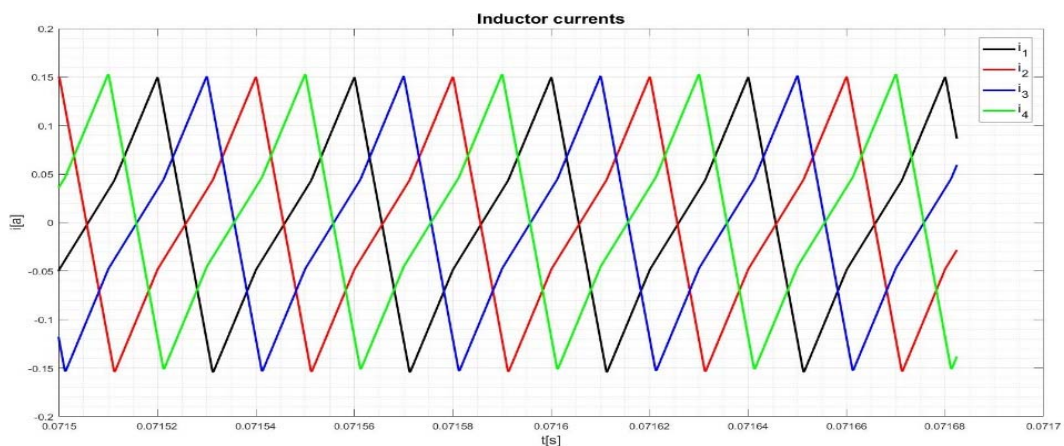
ahol U_{low} a kétirányú 4FL DC-DC áramirányító bemeneti alacsony feszültsége, D_{MAX} az áramirányító meghajtása során alkalmazott legnagyobb kitöltési tényező, ΔI_L a maximális áramváltozás a tekercsben egy kapcsolási periódus alatt, illetve f_s az áramirányító kapcsolási frekvenciája.



3. ábra

A 4-fázisú átlapolásos vezérlésű DC-DC áramirányító alsó tranzisztorainak a logikai vezérlőjelei

A 4-fázisú DC-DC áramirányító csatolt tekercseinek a szimulált átlapolt áramait (i_1 , i_2 , i_3 és i_4) a 4. ábrán szemléltetjük.



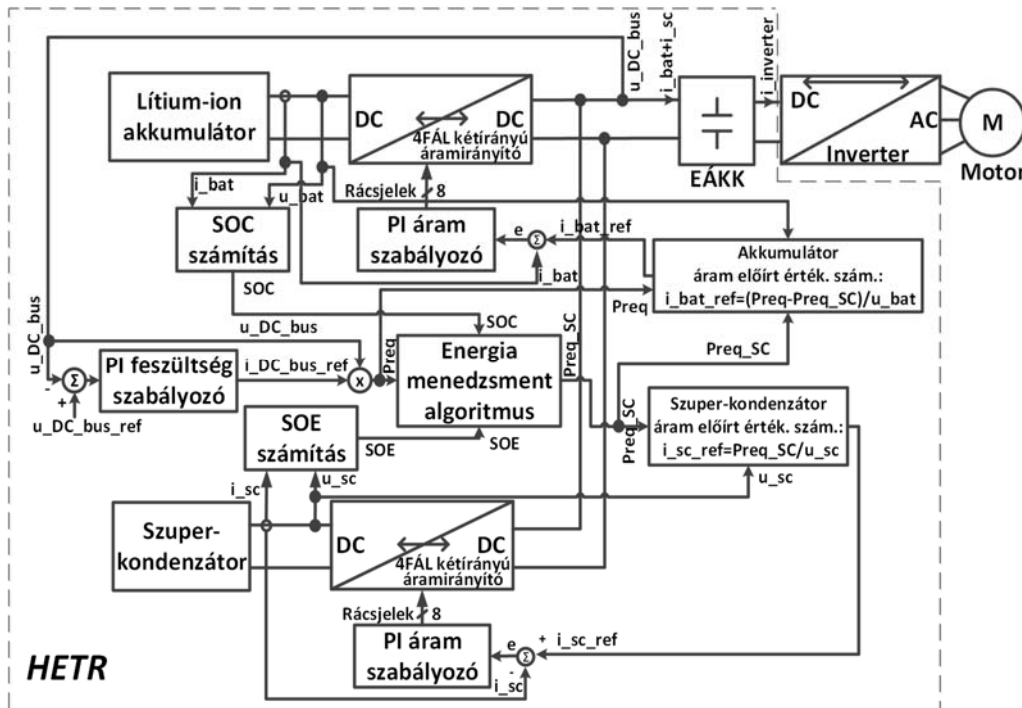
4. ábra

A 4-fázisú DC-DC áramirányító átlapolt bemeneti áramai az alacsony feszültségű oldalon.

3. Az aktív párhuzamos HETR teljesítménymegosztásának a szabályozása

Tanulmányozva a nemzetközi szakirodalomban közölt hasonló HETR rendszereket, az 5. Ábrán bemutatott szabályozási struktúrát állítottuk össze [4], [5], [6].

Állandósult állapotban az 1. Ábra DC-DC áramirányítói által leadott összteljesítmény a terhelés által felvett teljesítményt kell fedezze. Ha az áramirányítók által leadott teljesítmény kisebb a terhelés által felvett teljesítménynél, ez az EÁKK kondenzátorában tárolt energiának, vagyis az EÁKK feszültségének a csökkenését eredményezi. Ilyen módon a 5. Ábrán látható szabályozási struktúra feszültség-szabályozójának kimenete tulajdonképpen a teljesítményszabályozók P_{req} alapjeleként értelmezhető. Ezt a feszültség-szabályozó által támasztott összteljesítmény-igényt az akkumulátor és a szuperkondenzátor kell kiszolgálnia.



5. ábra

A megmodellezett és szimulált HETR szabályozási struktúrája.

Az aktív párhuzamos HETR energiamenedzsment-algoritmus határozza meg azt a P_{reqSC} pillanatnyi teljesítményt, amelyet a szuperkondenzátornak kell biztosítania úgy, hogy az akkumulátor ne károsodjék. Az egyes energiaforrások teljesítményreferenciái az alábbi összefüggések szerint számíthatók:

$$\begin{cases} x = \frac{P_{reqSC}}{P_{req}} 100 \\ P_{BAT} = P_{req} - P_{reqSC} \end{cases}, \quad (2)$$

ahol x százalékban a P_{reqSC} részaránya az igényelt összteljesítményből.

Az energiamenedzsment-algoritmus az igényelt szuperkondenzátor-teljesítményt az akkumulátor töltöttségi állapotából (SOC – „State of Charge”), a szuperkondenzátor energiaállapotából (SOE – „State of Energy”), valamint az EÁKK feszültségének a fenntartásához szükséges P_{req} összteljesítményből számítja ki.

Regeneratív fékezési üzemmódban a P_{req} negatív, mivel a villamos gép által az EÁKK-ba visszatermelt energia a kondenzátorfeszültség növekedését eredményezné, aminek megakadályozása csak a többlet-energiának a szuperkondenzátorba, illetve az akkumulátorba való visszatermelésével lehetséges.

Az áram-alapjелеk értékeinek a meghatározása az energiamenedzsment-algoritmus által előírt teljesítménymegosztás és a két energiatároló feszültség szintjének az ismeretében történik:

$$\begin{cases} i_{SC_REF} = \frac{x}{100} \frac{P_{req}}{U_{SC}} \\ i_{BAT_REF} = \frac{100-x}{100} \frac{P_{req}}{U_{BAT}} \end{cases} \quad (3)$$

ahol U_{SC} és U_{BAT} a szuperkondenzátor, illetve az akkumulátor feszültsége.

4. Az aktív párhuzamos HETR szimulációja

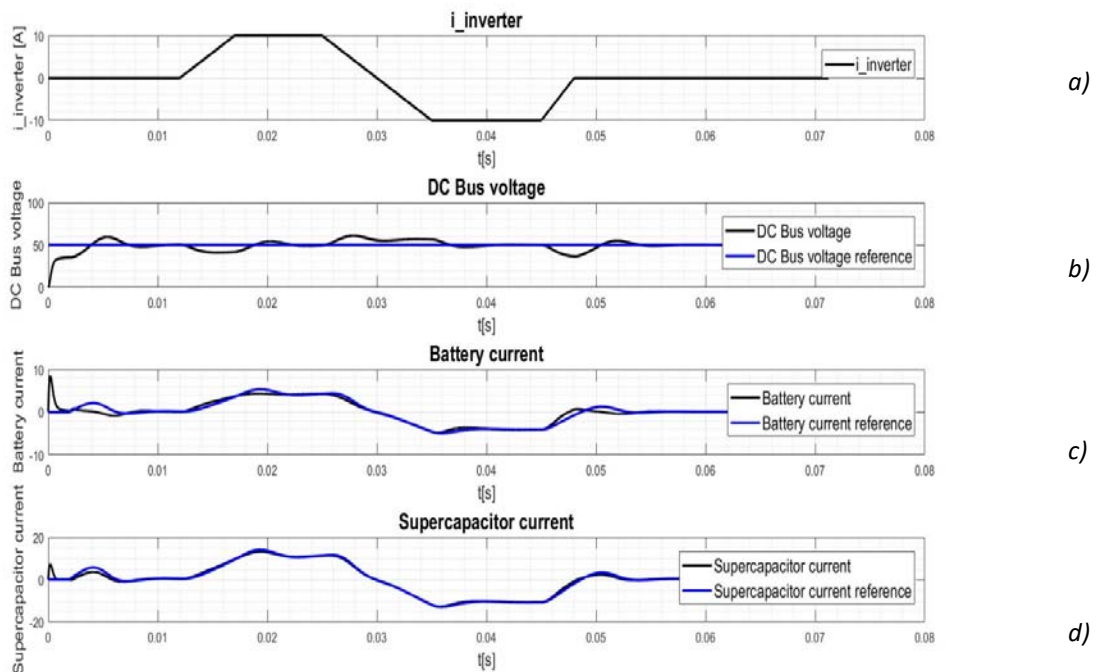
Az 1. Ábrán bemutatott HETR rendszer és az 5. Ábrán látható szabályozási struktúra modellezését és szimulációját MATLAB/Simulink® környezetben végeztük el.

Az 6. Ábra szemlélteti az $u_{DC_bus} = 50V$ -ra szabályozott EÁKK feszültségváltozását menet- illetve regeneratív fékezési üzemmódokban. Itt az EÁKK táplált villamos hajtást $i_{inverter}$ áramú áramforrás helyettesíti.

A $t \in (12ms - 30ms)$ időintervallumban a HETR energiaforrásként működik, és az áramszabályozott DC-DC áramirányítók pozitív árammal fedezik a fogyasztó által felvett teljesítményt úgy, hogy a teljesítménymegosztás az akkumulátor és a szuperkondenzátor között az energiamenedzsment-algoritmus által éppen előírt 3/7 arányban történjen. Ebben az esetben a szimuláció $u_{bat} = 36V$ és $u_{sc} = 20V$ feltétellel történik.

A $t \in (30ms - 48ms)$ időintervallumban a HETR energiatárolóként működik, ugyanis az áramszabályozott DC-DC áramirányítók negatív árama azt jelenti, hogy a hibrid energiaforrás felveszi az inverteren keresztül a fogyasztó által visszatermelt teljesítményt.

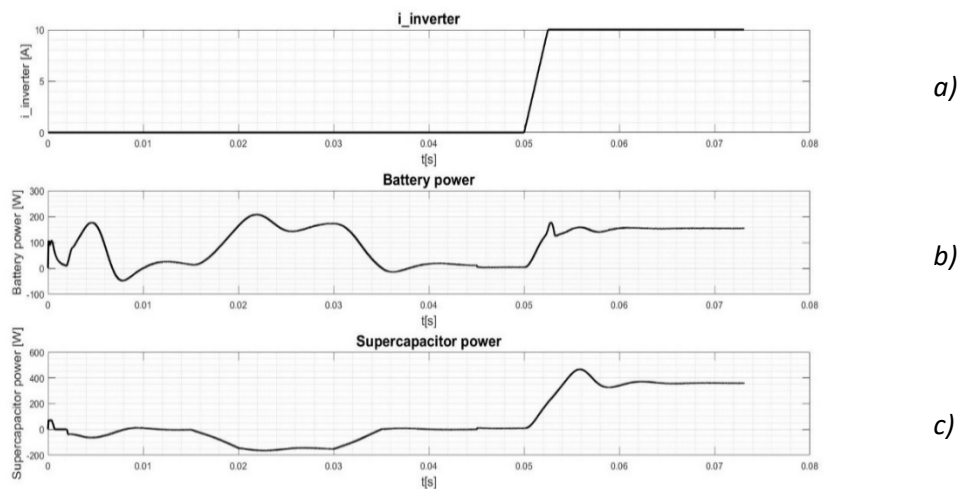
A $t \in (0ms - 12ms)$ időintervallumban a terhelés nulla, és a DC-DC áramirányítók betáplálását követően azok csak az EÁKK $C_{DC} = 200 \mu F$ -os kondenzátor feltöltését kell biztosítsák.



6. ábra

Szimulációs eredmények: Az EÁKK $i_{inverter}$ bemeneti árama (a) és feszültsége (b) valamint a két energiatároló az akkumulátor árama (c) és a szuperkondenzátor árama (d).

A 7. Ábrán a $t \in (20\text{ms} - 30\text{ms})$ időintervallumban egy $C_{sc} = 43\text{ F}$ kapacitású, $u_{sc} = 32\text{ V}$ kezdeti feszültségre feltöltött szuperkondenzátor konstans árammal ($i_{sc} = -5\text{ A}$) történő töltését szemlélteti, ami $P_{reqSC} \approx -150\text{ W}$ „negatív” teljesítményt eredményez a szuperkondenzátoron, a 7. Ábra b) diagramja szerint.



7. ábra

Szimulációs eredmények a HETR két üzemmódjának szemléltetésére: a két energiaforrás közötti teljesítménymegosztás alakulása az $i_{inverter}$ terhelő áram (a) hirtelen változása következtében a $t = 50\text{ ms}$ pillanatban, a szuperkondenzátor (c) akkumulátorról (b) történő töltése alatt.

A szuperkondenzátor töltése az akkumulátorról történik az EÁKK-re csatlakozó két DC-DC áramirányítón keresztül, a 7. Ábra b) és c) diagramjainak megfelelően. Ezt követően, a $t \in (50\text{ms} - 73\text{ms})$ időintervallumban, a $P_{req} = 500\text{ W}$ -os teljesítményigénynek megfelelően, mind az akkumulátor, mind a szuperkondenzátor energiát szolgáltat a terhelésnek.

5. Következtetések

A dolgozatban bemutatott szimulációs eredmények alátámasztják a kétirányú, átlapolásos vezérlésű DC-DC áramirányítókkal felépített HETR szabályozási struktúrájának a működőképességét.

A szimulációk során felhasznált paraméterek megfelelnek egy, a jövőben gyakorlati kivitelezésre szánt, 0.5 kW teljesítményű villamos kerékpár hajtását tápláló hibrid energiatároló rendszernek.

Irodalomjegyzék

- [1] Jian Cao, Ali Emadi „A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, Nr. 1, IEEE, January 2012, pp. 122-124.
- [2] Saowanee Kanta, Boonyang Plangklang, Wanchai Subsingh „Design of a bi-directional DC-DC 4 phase interleave converter for PV applications”, 11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering, Energy Procedia, September 2014, pp. 604-609.
- [3] Wensong Yu, Jih-Sheng Lai „Ultra High efficiency bidirectional DC-DC converter with multi-frequency pulse width modulation”, Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE, February 2008, pp. 1079-1084.
- [4] Jérémy Dulout, Bruno Jammes, Lionel Séguier, Corinne Alonso „Control and design of a hybrid energy storage system”, 2015 17th EPE – European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE, October 2015, pp. 1-9.
- [5] Ujjal Manandhar, Abhisek Ukil, Sathish Kumar Kollimalla, H. B. Gooi „Application of HESS for PV system with modified control strategy”, 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), IEEE, January 2016 pp.1- 6.
- [6] Mamadou Baïlo Camara, Hamid Gualous, Frederic Gustin, Alain Berthon „Design and new control of DC/DC converters to share energy between supercapacitors and batteries in hybrid vehicles”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, Nr. 5, September 2008, pp. 1-15.